

METODOLOGÍA PARA LA ESTIMACIÓN DEL FACTOR TOPOGRÁFICO, LS, DE LOS MODELOS RUSLE Y USPED BAJO ENTORNO SIG

José Luis García Rodríguez y M. C. Giménez Suárez

Laboratorio de Hidráulica e Hidrología. Dpto. de Ingeniería Forestal. Universidad Politécnica de Madrid. Ciudad Universitaria s/n. 28040-MADRID (España). Correo electrónico: josel.garcia@upm.es

Resumen

El modelo paramétrico USLE y sus actuales revisiones, RUSLE, RUSLE3D y USPED, continúan siendo los modelos de mayor aplicación para determinar los efectos de la erosión hídrica en cuencas de montaña. En estos modelos, los efectos de la topografía sobre la pérdida de suelo están representados por el factor combinado, *LS*, siendo éste factor, uno de los cinco componentes del modelo, los cuáles forman una ecuación cuyo producto estima la pérdida media anual de suelo por unidad de área. El objetivo de este trabajo es el establecimiento de una metodología, para el cálculo del factor *LS*, concreta y adaptada para su integración en los sistemas de información geográfica. Esto no solo permite una estimación más precisa del factor *LS*, sino también, de los valores y sobre todo, de la distribución de los sedimentos removidos por efecto de la erosión hídrica.

Palabras claves: *Erosión hídrica, Modelos, SIG, Topografía, Factor LS*

INTRODUCCIÓN

Cuando se utilizan los modelos USLE o RUSLE, los efectos de la topografía sobre la pérdida de suelo están representados por el factor combinado, *LS*, siendo éste factor, uno de los cinco componentes del modelo, los cuáles forman una ecuación cuyo producto estima la pérdida media anual de suelo por unidad de área.

En todas las investigaciones o planes de gestión que aplican los modelos USLE/RUSLE, el factor *LS*, siempre es estimado de manera diferente (GIMÉNEZ, 2008; GARCÍA Y GIMÉNEZ, 2010a,b). La falta de establecimiento de una metodología que uniforme el criterio de cálculo del factor *LS*, en combinación con las últimas tecnologías de sistemas de información geográfica, es el objetivo de este trabajo.

OBJETIVO

El objetivo de este trabajo es la generación de una metodología, mediante la combinación de procesos y sistemas de información geográfica (SIG), para la estimación del factor topográfico *LS* de los modelos RUSLE/USPED.

MATERIAL Y MÉTODOS

Area de Estudio

La cuenca elegida para la aplicación de la metodología, fue la del Arroyo del Lugar situada en el término municipal de Puebla de Valles (Guadalajara). Esta cuenca forma parte del tramo medio del río Jarama, ubicado al noroeste de la provincia de Guadalajara, perteneciente

a la Cuenca Hidrográfica del Tajo, España (Figura 1).

La totalidad de la superficie que drena al Arroyo del Lugar es 768,62 ha y la longitud total del Arroyo es de 7.253m.

Modelo USLE/RUSLE

El modelo USLE fue dado a conocer por WISCHMEIER & SMITH (1965) en base a los datos proporcionados por más de 10.000 parcelas repartidas por las principales áreas agrícolas de los Estados Unidos, para la estimación de la erosión laminar y en regueros.

En 1997, el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) presentó la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo Revisada (RUSLE), en el Agriculture Handbook n° 703 (RENARD et al., 1997), la cual calcula la erosión laminar y en regueros generada por la precipitación y la escorrentía asociada, para un perfil de ladera.

Como una revisión y actualización del modelo USLE, RUSLE incorporó información desde regiones montañosas y otros sitios de los Estados Unidos que mejor considerablemente

las estimaciones de erosión sobre zonas no-agrícolas (RENARD et al., 1997).

Los modelos USLE/RUSLE, teniendo en cuenta que la cantidad de suelo transportado y erosionado es controlado por la capacidad del flujo de agua en separar y mover sedimentos a través del paisaje, asumen que este flujo puede transportar una cantidad infinita de sedimentos, y que la cantidad de suelo erosionado está limitado solamente por la capacidad del agua para desprender suelo, y por tanto se los conoce como *modelos de capacidad de desprendimiento limitado (Detachment limited)*. Debido a este supuesto, no predicen la deposición en la cuenca (MITASOVA et al., 2008 [en línea]). La expresión general del modelo USLE/RUSLE es la siguiente:

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P$$

Donde,

A, son las pérdidas de suelo en tn·ha·año.

R, es índice de erosión pluvial (hj·cm/m²·hora)

K, es el índice de erosionabilidad del suelo (tn·m²·h/ha·hj·cm)

C, es el factor cultivo (vegetación o de uso del suelo)

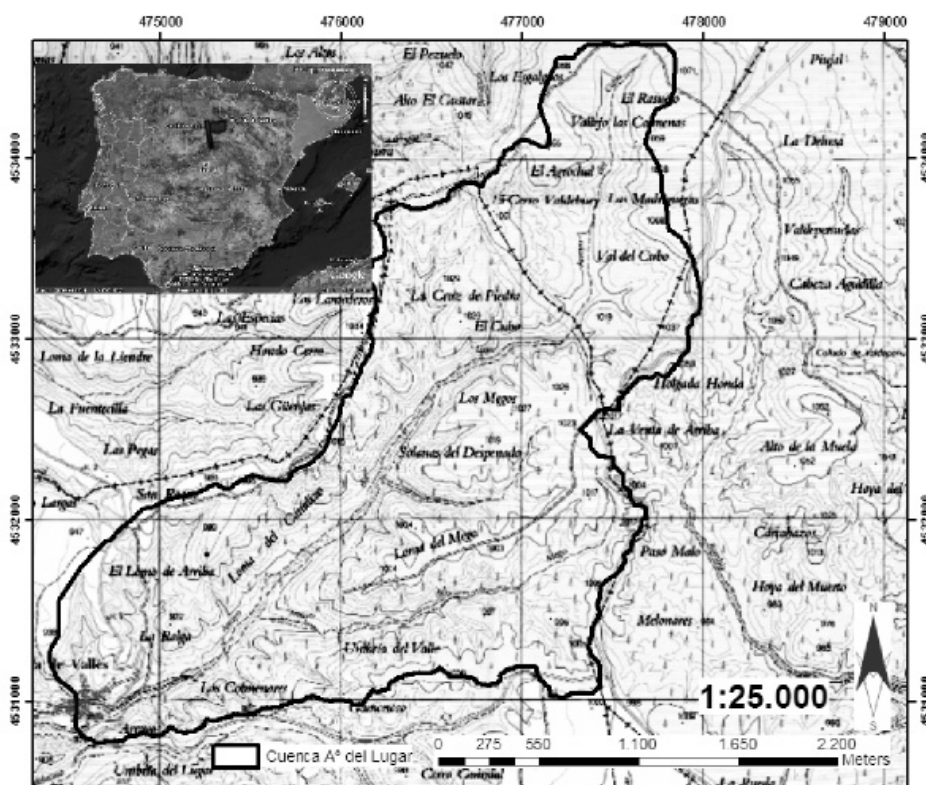


Figura 1. Ubicación geográfica de la cuenca de A° del Lugar (Puebla de Valles, Guadalajara)

P , es el factor de prácticas de conservación de suelos agrícolas

LS , es el factor topográfico formado por los factores, longitud de pendiente, L , y de pendiente, S .

Donde las ecuaciones para el cálculo de LS según RUSLE son (RENARD *et al.*, 1997):

$$L = \left(\frac{\lambda}{22,13} \right)^m \quad (1)$$

$$S = 10,8 \text{sen} \theta + 0,03; \text{ para } p < 9\%$$

$$S = 16,8 \text{sen} \theta - 0,05; \text{ para } p > 9\%$$

Donde:

L , Subfactor longitud del terreno (adimensional)

S , Subfactor pendiente del terreno (adimensional)

λ , Longitud del terreno (m)

m , Exponente variable según relación erosión en regueros a erosión en interregueros

θ , Ángulo de inclinación de pendiente

p , Pendiente del terreno (%)

Modelado Espacial con RUSLE3D

En la década de los 80 se comenzó a pensar en que la aplicación del factor LS era poco práctica en cuencas hidrográficas, ya que la variación de la longitud de pendiente, λ , es un parámetro difícil de representar a estas escalas de trabajo.

El modelo USLE, como se sabe, es una ecuación empírica diseñada para el cálculo de la pérdida promedio de suelo en campos agrícolas. Han sido aplicadas a menudo, varias modificaciones a esta ecuación en la estimación de la pérdida de suelo usando SIG. El RUSLE usa los mismos principios que la USLE, sin embargo, incluye

numerosas mejoras, tales como la incorporación de la influencia de la concavidad/convexidad usando la segmentación de pendientes irregulares, y la mejora en las ecuaciones empíricas para el cálculo del factor LS (RENARD *et al.*, 1991).

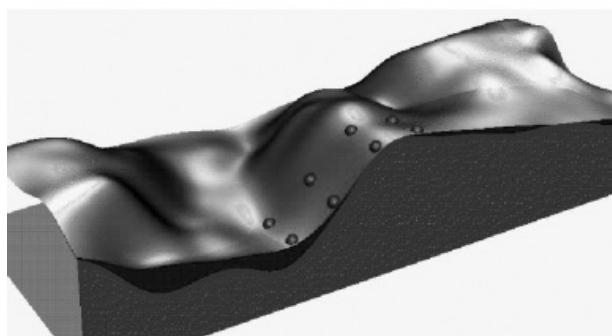
Pero para incorporar el impacto de la convergencia del flujo, el factor de longitud de pendiente, λ (Ecuación 1), fue remplazado por el área de contribución aguas arriba, A (MOORE & BURCH, 1986; MITASOVA *et al.*, 1996; DESMET & GOVERS, 1996). Este cambio en el concepto del factor LS ocasiona que el modelo RUSLE se lo llame RUSLE3D.

El impacto de reemplazar el largo de pendiente por el área de contribución aguas arriba, A , se ilustra en la Figura 2, las cuáles muestran que el factor basado en, A , refleja mejor el efecto del flujo concentrado (MITASOVA *et al.*, 2008 [en línea]).

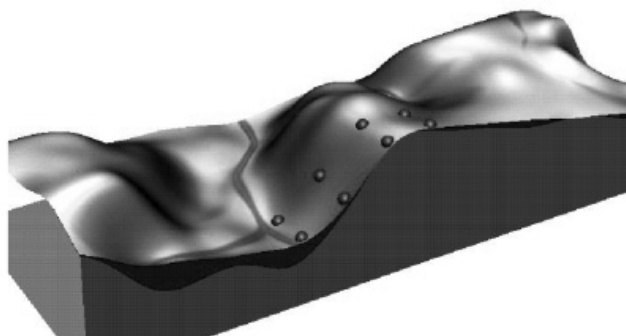
El término A , puede caracterizar el efecto de convergencia y divergencia del terreno sobre la erosión del suelo, a diferencia del término λ (longitud de pendiente en m) en el $USLE$ y $RUSLE$ que sólo es aplicable a una superficie en 2D, es decir, sin considerar la convergencia y divergencia de las laderas (MOORE & WILSON, 1992). MITASOVA *et al.* (1996), basándose en los estudios de DESMET & GOOVERS (1996), derivó una ecuación de forma continua (Ecuación 2) para calcular el factor LS en un punto $r = (x,y)$ sobre una pendiente:

$$LS(r) = (m + 1) \left[\frac{A_e(r)}{22,13} \right]^m \left[\frac{\text{sen } b(r)}{\text{sen } 5,143^\circ} \right]^n \quad (2)$$

Donde, A_e , es el área específica obtenida a partir de la relación entre el área de contribución



LS basado en la longitud de pendiente, λ



LS basado en el área de contribución aguas arriba, A

Figura 2. Comparación gráfica del valor del factor LS , de acuerdo a si este se determina utilizando la longitud de pendiente (λ) o el área de contribución aguas arriba, A . Extraída de MITASOVA *et al.* (2008 [en línea])

aguas arriba, A , y la unidad de ancho de contorno o curva de nivel; b , es el ángulo de la pendiente en grados y, m y n , son parámetros variables. Los valores típicos para el parámetro m contemplan un intervalo entre 0,4 a 0,6; mientras que para n entre 1,0 a 1,4. Valores bajos de estos parámetros serían susceptibles de utilizar en zonas en que el flujo fuera de tipo laminar, con buena cobertura vegetal, y con poca probabilidad de escorrentía concentrada en regueros o surcos. Los valores más altos de los parámetros se emplean en zonas con flujo turbulento, con facilidad de aparición de pequeñas cárcavas y regueros.

Modelación Espacial de la Erosión y Deposición con USPED

El método USPED (*Unit Stream Power – based Erosion/Deposition*) expuesto por MITASOVA et al. (1996), el cuál para su aplicación hace uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), es un modelo que predice la distribución espacial de las tasas de erosión y deposición para un flujo superficial con régimen uniforme bajo condiciones de exceso de precipitación uniforme.

En este caso se asume que el flujo de agua puede transportar una cantidad limitada de sedimentos dada por la capacidad de transporte del flujo de agua. Estos métodos también asumen que la cantidad de sedimentos transportados por el agua es siempre la máxima cantidad que puede transportar. Por consiguiente, en los puntos donde la capacidad de transporte se incrementa, se produce erosión; donde la capacidad de transporte decrece, ocurre sedimentación. Por estas características, USPED integra el grupo de los denominados *Modelos de capacidad de transporte limitada (Transport capacity limited)*.

Este modelo está basado sobre la teoría originalmente diseñada por MOORE & BURCH (1986), pero con numerosas mejoras. USPED asume que como la capacidad de transporte es limitada, la tasa de flujo de sedimentos en un punto $q_s(r)$ se aproxima a la capacidad de transporte de sedimentos $T(r)$. La ecuación correspondiente en un punto $r=(x,y)$ sería:

$$|q_s(r)| = T(r) = K_t(r) |q(r)|^m \text{sen } b(r)^n$$

Donde, $b(r)$, es la pendiente en grados
 $q(r)$, es el caudal líquido ($m^3 \cdot s$)

$K_t(r)$, es el coeficiente de transporte del suelo ($kg \cdot m^{-3}$)

m y n , son los mismos exponentes ya vistos para RUSLE3D que dependen del tipo de flujo dominante (en regueros o laminar). El modelo propone que valores típicos para los exponentes serían $m=1,6$ y $n=1,3$ en el caso que la erosión dominante sea en regueros y de $m=n=1$ si es de tipo laminar (MITASOVA et al., 2008 [en línea]).

Hasta el momento no se ha llevado ningún trabajo experimental para desarrollar los parámetros necesarios para el USPED, por lo que directamente se utilizan los parámetros del USLE/RUSLE para incorporar el impacto aproximado del suelo y la cobertura en al menos una estimación relativa de la erosión y deposición neta. Por tanto, se asume que se puede estimar el flujo de sedimentos en la capacidad de transporte de sedimentos como:

$$T = R \cdot K \cdot C \cdot P \cdot A_e^m (\text{sen } b)^n \quad (1)$$

Donde R , el factor de erosionabilidad que se aproxima con i^m

KCP , factores del modelo RUSLE que se aproximan a K_t ,

LS , el factor topográfico en este caso se considera igual a $A_e^m (\text{sen } b)^n$

El modelo USPED calcula la erosión/deposición neta como la divergencia en la capacidad de transporte de sedimentos (flujo de sedimentos) para una celda de cálculo dada. Este cálculo es conducido a través de una grilla de celdas en un sistema de información geográfica (SIG). La convención usada en USPED es que una divergencia negativa (valores negativos) denota exceso de erosión sobre deposición.

Procedimiento General

El software utilizado en este trabajo fueron los Sistemas de Información Geográfica ArcGIS 9.1 (ESRI, 2005) y SEXTANTE (OLAYA, 2006), y para el análisis estadístico, los programas SPSS 11 y algunas de las funcionalidades estadísticas de Microsoft Office Excel 2003.

La utilización del SIG SEXTANTE se fundamenta en el gran desarrollo que este presenta en el análisis hidrológico integrando diferentes algoritmos relacionados con el cálculo tanto de pendientes como de flujo acumulado, a diferencia de ArcGIS, que está limitado a una sola opción.

A modo de resumen, para alcanzar el raster final con los valores del factor *LS*, y posteriormente integrarlo en *RUSLE3D* y *USPED*, se deben cumplir los siguientes pasos:

- I. Creación del modelo de elevación digital (DEM).
- II. Cálculo del mapa de valores de inclinación de pendiente.
- III. Cálculo del mapa de flujo acumulado (área de contribución aguas arriba, *A*).
- IV. Cálculo del mapa del Área Específica, *A_e*.
- V. Cálculo del mapa del Factor *LS* para *RUSLE3D* y *USPED*.
- VI. Cálculo de la erosión con *RUSLE3D* y erosión/deposición con *USPED*.

Para el establecimiento de la metodología que permita obtener valores más precisos de *LS*, y por ende de la posterior estimación de la erosión hídrica, en cada etapa se analizaron todos los algoritmos matemáticos disponibles en cada caso, recurriendo a aquél que menor error presentó al compararlo con valores tomados a campo. Por cuestiones de espacio en este artículo no serán comentados.

RESULTADOS.

El *diagrama de flujo* (Figura 3) que se muestra a continuación, concentra en una página los

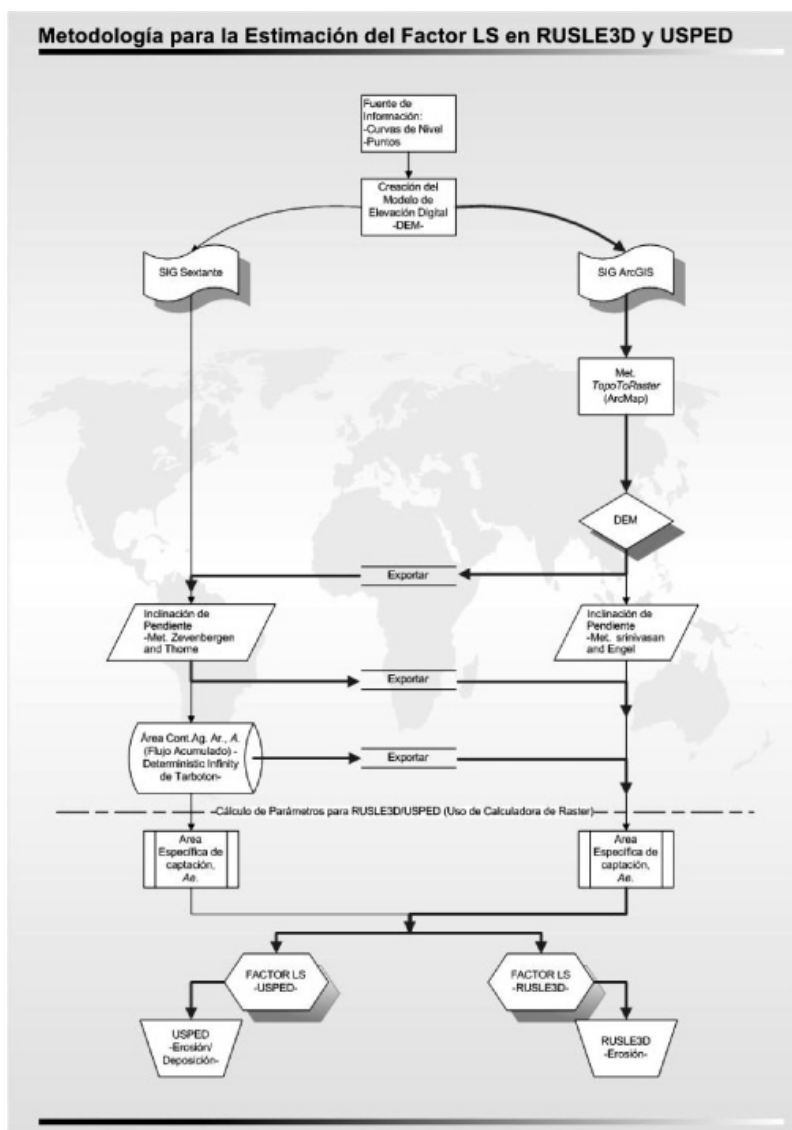


Figura 3. Diagrama de flujo mostrando la metodología para determinar el factor *LS* (*RUSLE3D/USPED*)

pasos a seguir para una estimación más precisa del factor LS, mediante la combinación de procesos y sistemas de información geográfica (SIG). Además, intenta servir de guía para facilitar la obtención del factor LS y su integración tanto en *RUSLE3D* como en *USPED*. En cada paso se recomienda la utilización de la metodología que mejores resultados mostró de acuerdo a las investigaciones realizadas.

DISCUSION

En el diagrama de flujo se resalta la posibilidad de combinar dos sistemas de información

geográfica, para la obtención del factor LS. La línea más oscura describe lo que de acuerdo a los resultados, aplicación práctica y precisión, sería la metodología más adecuada a seguir. Se podrá observar también, que la metodología propuesta tiende a basarse siempre sobre ArcGIS, ya que en la actualidad es el SIG de mayor uso en el mundo y los diferentes usuarios están más habituados a sus aplicaciones, sobretudo en lo que respecta al módulo de la calculadora de raster (*raster calculator*), necesaria en la estimación de parámetros como el área específica, A_e , y en la creación de los mapas de erosión.

En la Figura 4, se muestran las estimaciones que resultan de la aplicación de los modelos

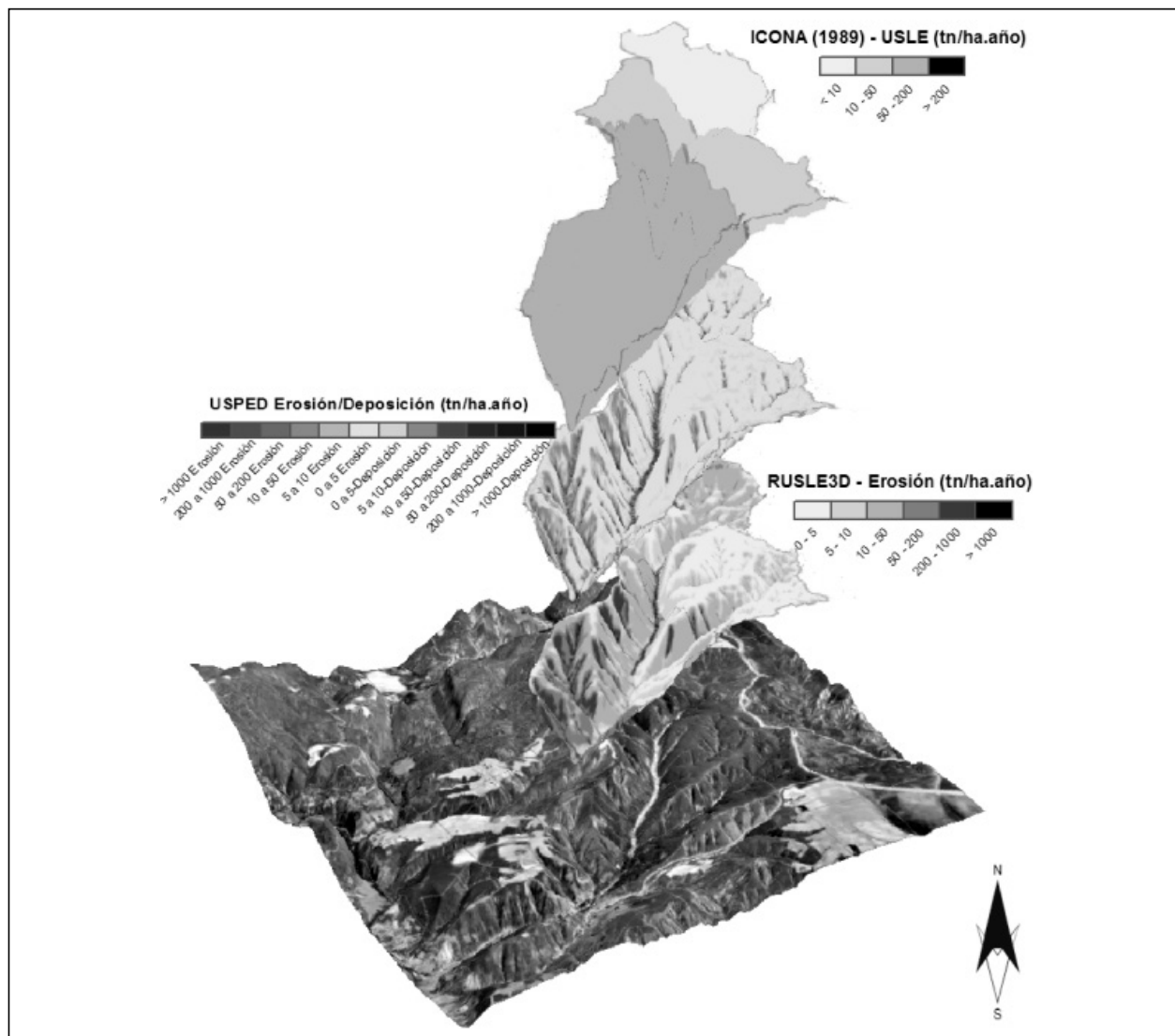


Figura 4. Comparación vertical en 3D de los mapas de erosión calculados con *RUSLE3D* y *USPED*, más el mapa de erosión de *ICONA* (1989), para la cuenca de A° del Lugar

RUSLE3D y USPED sobre Ayo. del Lugar, donde se puede apreciar la diferencia existente con el procedimiento seguido al aplicar el modelo USLE por el ICONA (1989). Esto demuestra la capacidad de los nuevos modelos en la predicción y detección de la erosión hídrica y la mejora en la gestión de cuencas afectadas por problemas de erosión hídrica.

CONCLUSIONES

La principal conclusión de este trabajo es el establecimiento de una metodología, para el cálculo del factor LS, concreta y adaptada para su integración en los sistemas de información geográfica. Esto no sólo permite una estimación más precisa del factor LS, sino también, de los valores y sobretodo, de la distribución de los sedimentos removidos por efecto de la erosión hídrica.

BIBLIOGRAFÍA

- DESMET, P.J.J. & GOVERS, G.; 1996. Comparison of Routing Algorithms for Digital Elevation Models and Their Applications for Predicting Ephemeral Gullies. *Int. J. GIS*. 10: 311-331
- ESRI; 2005. *ArcGIS Version 9.1 Desktop Help User's Manual*. Environmental Systems Research Institute. Redlands, CA. USA.
- ICONA; 1989. *Mapas de Estados Erosivos - Cuenca Hidrográfica del Tajo*. Instituto Nacional Para La Conservación De La Naturaleza. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid.
- MITASOVA, H.; BROWN, W.M.; JOHNSTON, D. & MITAS, L.; 1996. *GIS Tools for Erosion/Deposition Modeling and Multidimensional Visualization. PART II: Unit Stream Power-Based Erosion/Deposition Modeling and Enhanced Dynamic Visualization*. Report for USA CERL. University of Illinois. Urbana-Champaign.
- MITASOVA H.; BROWN W.M.; HOHMANN M. & WARREN S.; 2008 [en línea]. *Using Soil Erosion Modelling for Improved Conservation Planning: A GIS-based Tutorial Geographic Modelling Systems Lab*. UIUC. <http://skagit.meas.ncsu.edu/>
- MOORE, I.D. & BURCH, G.J.; 1986. Modelling Erosion and Deposition: Topographic Effects. *Trans. ASAE* 29: 1624-1630, 1640.
- MOORE, I. & WILSON, J.; 1992. Length-Slope Factors for the Revised Universal Soil Loss Equation: Simplified Method of Estimation. *J. Soil Water Conservation* 47(5): 423-428
- OLAYA, V.; 2006. *Fundamentos de Análisis Geográfico con SEXTANTE*. Edición 1.0. UNEX. Extremadura. España
- RENARD, K.G.; FOSTER G. R.; WEESIES, G.A. & PORTER, J.P.; 1991. RUSLE Revised Universal Soil Loss Equation. *J. Soil Water Cons.* 46: 30-33
- RENARD, K.G.; FOSTER, G.R.; WEESIES, G.A.; MCCOOL, D.K. & YODER, D.C.; 1997. *Predicting Soil Erosion by Water: A Guide To Conservation Planning With The Revised Universal Soil Loss Equation*, US Department of Agriculture, Agricultural Research Services, Agricultural Handbook 703. USA
- WISCHMEIER, W.H. & SMITH, D.D.; 1965. *Predicting Rainfall-Erosion Losses From Cropland East Of The Rocky Mountains: A Guide for Selection of Practices for Soil and Water Conservation*. Agriculture Handbook 282. U.S. Department of Agriculture, Washington, DC. USA.